



止於至善

第五篇 直 流 电 机 之

第十七章

直流发电机和直流电动机




東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

第十七章

直流发电机和直流电动机

- **直流发电机**
 - 自励发电机的电压建起
 - 运行特性
- **直流电动机**
 - 机械特性和工作特性
 - 起动、调速和制动

➤ 直流电机的换向和改善换向的方法 ×



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1. 直流发电机的电压建立

• 并励直流发电机

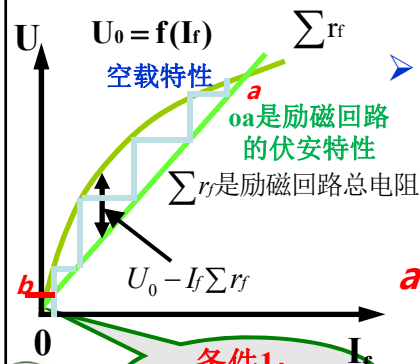
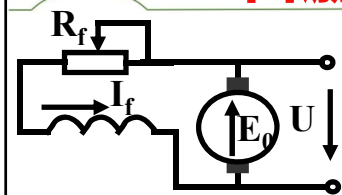
- 自励电机中最主要一类
- 电枢电压与励磁电压相等
- 电压建起
 - 从起始电压 $U = 0$ 开始，到产生稳定的端电压
- 建起条件
 - 剩磁、饱和、合适的励磁回路电阻
 - 励磁磁场与剩磁方向相同



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1. 自励发电机的电压建立



➤ 起动开始, $U=0$, 励磁电流 $I_f=0$

➤ 如果铁心存在剩磁, 当电枢旋转时, 电枢绕组中有小的感应电势 (b 点), 在励磁绕组中产生微小的励磁电流 I_{fb}

➤ 若 I_{fb} 产生的磁势与剩磁同方向, 则使磁场增强, 电枢绕组中的感应电势随之增加, 并产生更大的励磁电流

a 点之前: $U - I_f \Sigma r_f = L_f \frac{dI_f}{dt} > 0$

a 点: $U - I_f \Sigma r_f = L_f \frac{dI_f}{dt} = 0$



东南大学
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1.自励发电机的电压建立

$$U_0 = E_0 = f(I_f)$$

空载特性曲线：磁化曲线

$$U_0 = I_f \sum r_f$$

励磁回路电压方程：场阻线

自励发电机的电压建立条件1：

➤ 磁路的因素

• 存在剩磁

• 磁化曲线饱和现象

铁磁材料的饱和现象，使得磁化曲线与场阻线存在交点，即电机有确定的电压。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

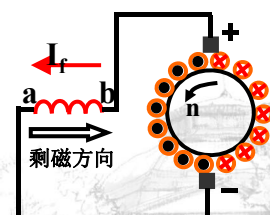
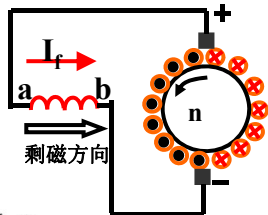
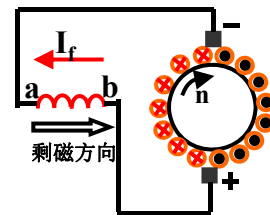
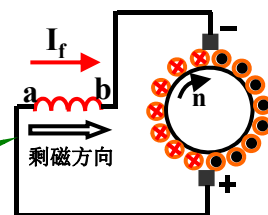
1.自励发电机的电压建立

— 励磁磁场须与剩磁同向

➤ 励磁绕组的接法与电枢旋转方向正确配合。

目的：使最初微小励磁电流增强原来的剩磁，使感应电势增加。

条件2：
磁场同向



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1.自励发电机的电压建立

—如果励磁电流消弱剩磁而使发电机电压不能建起时，可用以下两种方法改正

- 改变电枢绕组与励磁绕组的相对连接
- 改变电枢的旋转方向

—但不得同时改变



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

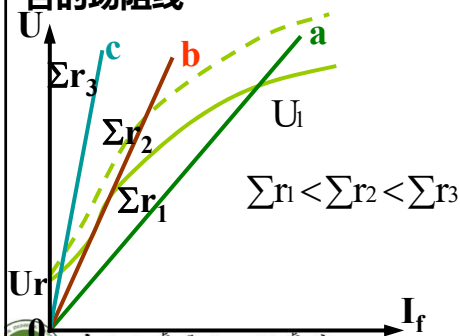
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1.自励发电机的电压建立

自励发电机的电压建立条件3:

➢励磁回路的影响：励磁回路的总电阻小于该转速时的临界电阻。

➢临界电阻：指一定转速时，与磁化曲线的直线部分（气隙线）重合的场阻线



0b线：场阻 r_2 ，场阻线与气隙线重合，无明确的交点，电压不能稳定。且场阻的微小变化将引起端电压的较大变化

0a线：场阻 r_1 （较小），稳定端电压 U_1

0c线：场阻 r_3 （较大），建立电压 U_2 很小，电压无法建立



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

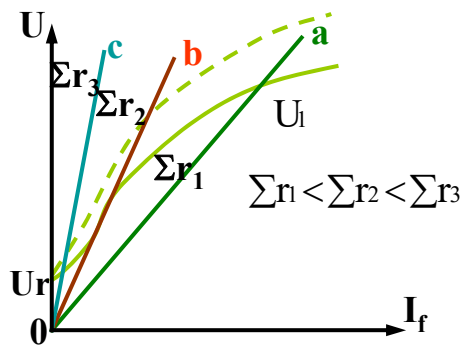
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

1.自励发电机的电压建立

提高电机转速:

➤ 磁化曲线发生变化, 如图中虚线, 临界场阻随转速增加而增大。

➤ 假设电机场阻不变, 如果原临界场阻小于电机场阻不能自励。转速增加后临界场阻大于电机场阻, 则电压可以建立。



空载电压与励磁回路电阻的大小和电机转速高低有关。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

1.自励发电机的电压建立

问题	直流发电机的剩余电压的大小与 () 有关
选项	A 铁心中的剩余磁通 B 电机的转速 C 电机的电势系数 D 与以上三个因素均有关

答案: D



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

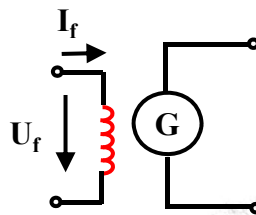
南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

2. 直流发电机的运行特性

• 他励发电机和并励发电机的区别

— 他励发电机

- 磁极的极性决定于励磁电流的方向
- 如把励磁电流的方向保持不变，而把电枢的旋转方向倒转，则电刷间电压的极性将倒转

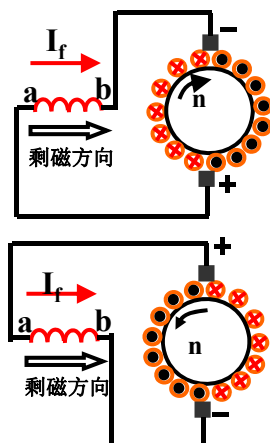


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

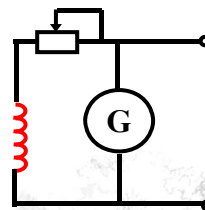
南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

2. 直流发电机的运行特性

— 并励发电机



- 剩磁的方向规定了磁极的极性
- 同时改变电枢的旋转方向和励磁绕组与电枢绕组的相对连接，可使电刷极性倒转



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

2. 直流发电机的运行特性

• 直流发电机稳态运行

— 主要变量

端电压 U 负载电流 I_L
励磁电流 I_f 电机转速 n

— 主要特性：保持 n 不变，其余三个变量中任意变量保持不变，其余两个变量之间的关系。

外特性 $U = f(I_L), I_f = \text{const}$

空载特性

负载特性

$U = f(I_f)$ 特例 $U_0 = f(I_f)$

调节特性

$I_f = f(I_L) \quad U = \text{const}$

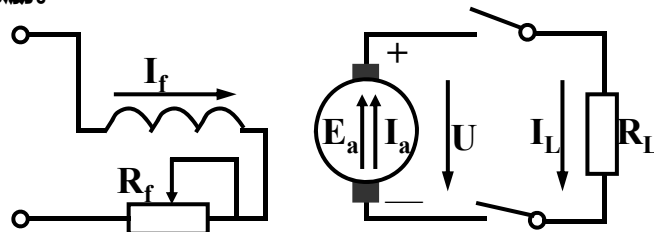


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

I 他励发电机的特性

- 励磁电流不随负载电流变化
- 励磁可调：电压调节范围大，适用于要求电压广泛可调的应用场合。工业上低压（4-24V）及高压（>600V）以上均为他励。



如何改变电机端电压极性？

$$E_a = C_e \Phi n$$

取决于电枢电势的方向：

1. 改变转向，而磁通方向不变
2. 改变磁通方向，而转向不变

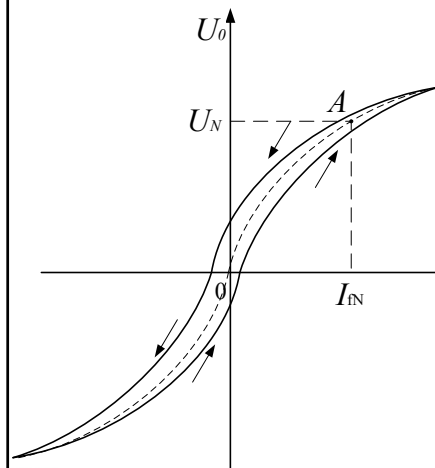


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

！他励发电机的特性

(a) 空载特性 $U_0 = f(I_f), I_L = 0$



即电机的**磁化曲线**，通过磁路计算，或空载实验得到。

$$E_0 = f(I_f)$$

$$\Phi = f(F_f)$$

$$\begin{cases} U_0 = E_0 = C_e n \Phi \\ F_f = N_f I_f \end{cases}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

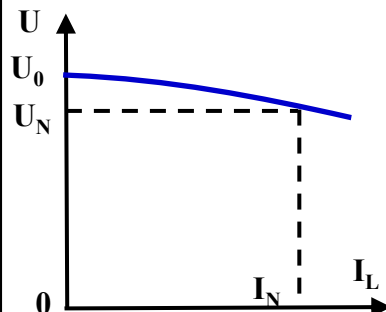
南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

！他励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L) \quad I_f = \text{const}$

$$E_a = U + I_a r_a + 2\Delta U \rightarrow U = E_a - \underline{I_a r_a} - 2\Delta U$$

$$\underline{E_a} = C_e n \underline{\Phi}$$



端电压下降的因素：

- 电枢回路中引起的电压降
- 电枢反应的去磁作用

$$\text{电压变化率} = \frac{U_0 - U_N}{U_N}$$

通常为 **5%~10%**



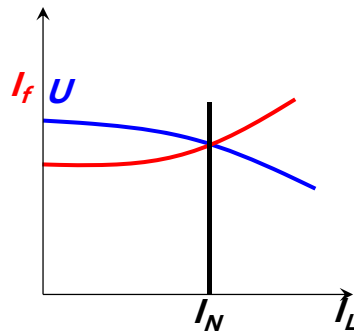
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 <http://ee.seu.edu.cn>

I 他励发电机的特性

(c) 调节特性 $I_f = f(I_L) \quad U = \text{const}$

$$U = E_a - I_a r_a - 2\Delta U$$



当有负载电流时，为要维持端电压不变，随着负载电流的增大，励磁电流相应增大

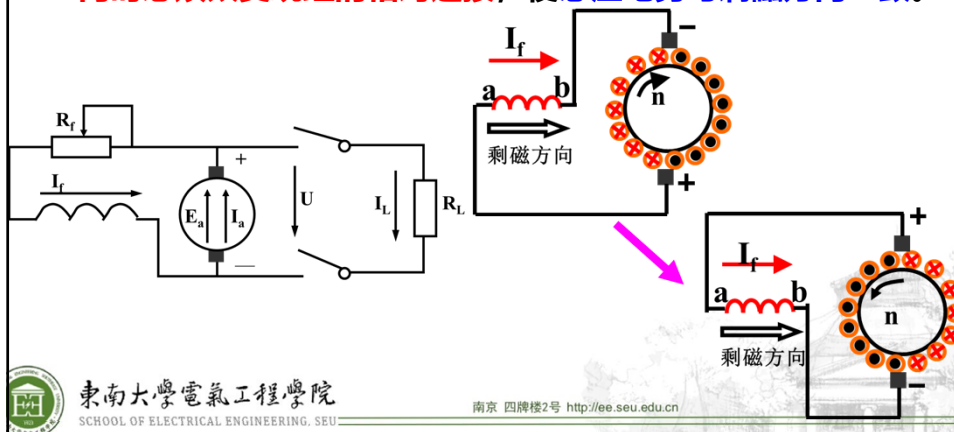


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并励发电机的特性

- 励磁绕组与电枢绕组并联，励磁电流由发电机电枢绕组自己供给，随电枢电压变化
- 如何改变电机端电压极性？
改变电刷间极性时应注意电压建立的问题，即改变原动机转向时必须改变绕组的相对连接，使感应电势与剩磁方向一致。



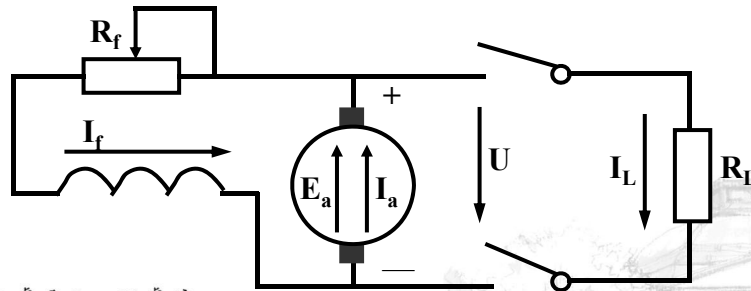
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并励发电机的特性

(a) 空载特性 $U_0 = f(I_{f0} = I_{a0}), I_L = 0$

- 并励发电机在空载时，电枢电流等于励磁电流。由于励磁电流很小，它流过电枢绕组所产生的电阻压降和电枢反应很小，故空载时的感应电势即可认为与空载端电压相等，所以，并励发电机的空载特性和它的磁化曲线相同。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

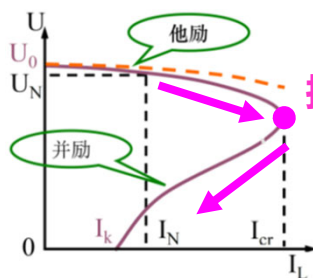
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), \sum r_f = \text{const}$

端电压下降的因素：

- 电枢回路的电压降；
- 电枢反应的去磁作用；
- 端电压下降引起的励磁电流减小。



电压变化率约为20%

- 当负载电阻不断减小时，负载电流 I_L 增加；
- 但当降至某一临界数值 I_{cr} 以后，若负载电阻继续减小，则负载电流 I_L 反将逐渐减小；
- 当电枢两端直接短路，负载电流将降为微小的短路电流 I_k 。

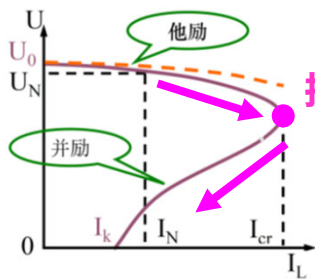


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), \sum r_f = \text{const}$



电压变化率约为20%

拐点产生的原因：

由于并励和磁路饱和程度变化而引起的。

1. 当 U 接近 U_N 时, R_L 减小, 负载电流 I_L 增大, I_f 因 U 的降低而减小, 此时磁路处于饱和状态, U 降低的幅度小于 R_L 减小的幅度, 所以 I_L 增大。

由于 $I_L = U/R_L$



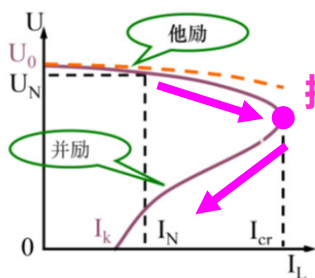
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), \sum r_f = \text{const}$

拐点产生的原因：



电压变化率约为20%

2. 当 I_L 达到临界值时, I_f 因 U 的降低而大幅减小, E_a 小于饱和值, 磁路退出饱和, 励磁电流的微小变化引起感应电势的较大变化。

$\therefore U$ 降低的幅度大于 R_L 减小的幅度, 所以 I_L 减小



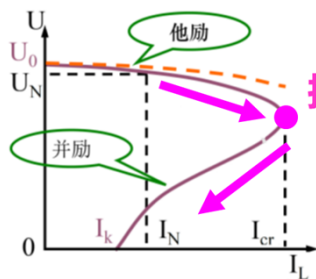
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), \sum r_f = \text{const}$

短路电流的解释:



直接短路时, 端电压 $U=0$, 励磁绕组电压等于0。励磁电流为0, 感应电势仅为剩磁电势, 并引起短路电流 I_k 。

短路的影响:

➤ 短路过程经过临界电流, 约为额定电流的2~3倍;

➤ 突然短路的瞬间: 由于励磁绕组有很大的电阻, 磁通不能立即变为零, i_{\max} 可达 $8 \sim 12 I_N$ 。

电压变化率约为20%

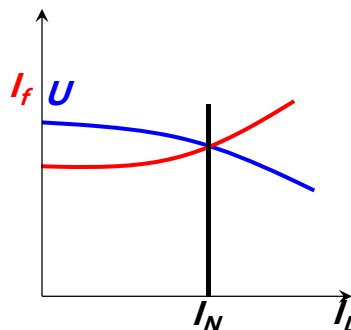


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并励发电机的特性

(c) 调节特性 $I_f = f(I_L) \quad U = \text{const}$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

并励发电机的电压

测试题			
序号	内容		答案
1	试题	若并励直流发电机转速上升20%，则空载时发电机的端电压 U_0 将（）。	
	选项	A 升高20% B 升高大于20% C 升高小于20% D 不变	
2	试题	一台并励直流发电机希望改变电枢两端正负极性，采用的方法是（）。	
	选项	A 改变原动机的转向 B 改变励磁绕组的接法 C 以上两种方法均可 D 以上两种方法均不可以	

答案：1. B, 2.D或(A+B)可以



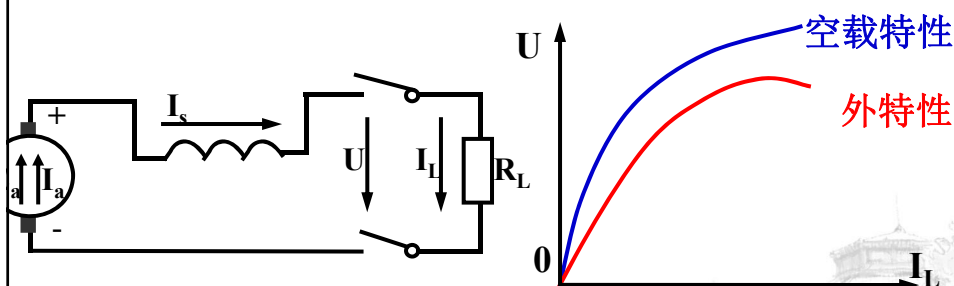
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III 串励发电机的特性

(a) 空载特性 $U_0 = f(I_f)$, $I_L = 0$

- 由**另外电源**供给励磁电流，以**他励方式**求得电机的空载特性，即磁化曲线。因为励磁绕组匝数较少，所需励磁电流较大，所得磁化曲线的形状与其他发电机相似，如图中曲线1所示。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

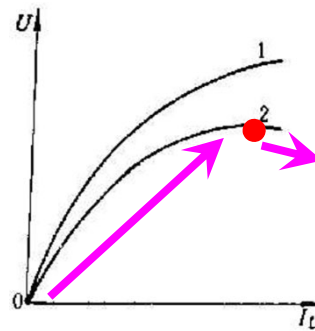
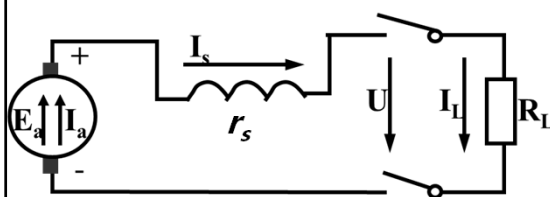
南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III 串励发电机的特性

(b) 外特性 $U = f(I_L), I_s \neq \text{const}$

$$I_L = I_s = I_a \quad U = E_a - I_a(r_a + r_s) - 2\Delta U$$

$$I_L \uparrow \rightarrow I_s(I_a) \uparrow$$



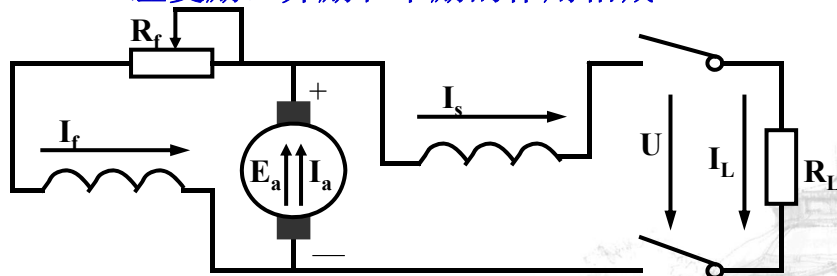
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號

IV 复励发电机的特性

复励发电机的外特性介于并励发电机与串励发电机外特性之间。复励的程度决定于串联励磁与并联励磁的相对强度，并联励磁通常要比串联励磁强的多。

- 积复励：并励和串励的作用相加
分为三种（平复励，超复励，欠复励）
- 差复励：并励和串励的作用相减



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV 复励发电机的特性

— 外特性：平复励

- 串励绕组的作用在抵消电枢反应去磁作用后，使增加的感应电势在满载时**恰好**补偿电枢回路中的电阻压降
- 这种**发电机的满载电压和空载电压相等**

超复励

- 串励绕组的磁化作用，能在满载时补偿电枢反应和电阻电压降而**有余**，使**发电机的满载电压高于空载电压**

欠复励

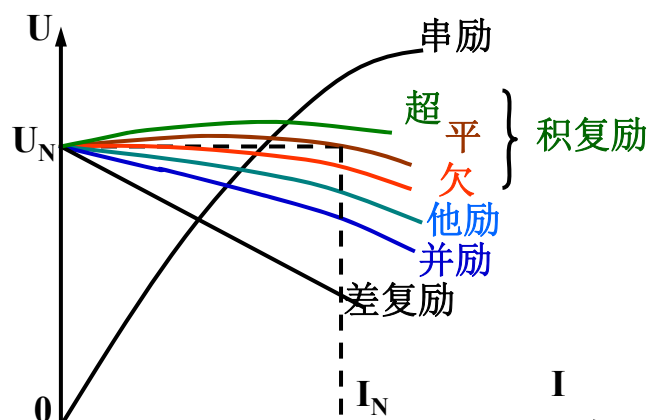
- 串励绕组的磁化作用，在满载时**不够**补偿电枢反应和电阻电压降的一部分，而**发电机的满载电压仍较空载电压为低**



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV 复励发电机的特性



各种发电机外特性



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流发电机的运行特性

例 [17-1]

并励发电机，转速为1450r/min，转速在1000r/min时取得的磁化曲线如下表所示。电枢绕组电 $r_a=0.516\Omega$ ，电刷接触电压降 $\Delta U=1V$ ，满载时的电枢电流为40.5A。满载时电枢反应的去磁作用相当于并励绕组励磁电流0.05A。

磁化曲线数据 (1000rpm)

I_{f0} (A)	0.64	0.89	1.38	1.73	2.07	2.75
E_0 (V)	70	100	150	172	182	196



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流发电机的运行特性

求：

1. 若满载端电压为230V。问并励回路的电阻为多少？电压变化率为多少？
2. 若在每一磁极上加绕串励绕组5匝，则可将满载电压提升至240V。问在每一磁极上的并励绕组有几匝？
3. 如将上述发电机的串励绕组增至10匝，问满载端电压为多少？



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流发电机的运行特性

• 解

- 将1000r/min时的磁化曲线换算到1450r/min的情况下，其数据见下表：

磁 化 曲 线 数 据 (1450rpm)

I_{f0} (A)	0.64	0.89	1.38	1.73	2.07	2.75
E_0 (V)	101.5	145	218	249	264	284



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流发电机的运行特性

- (1)
 - 在满载时的感应电势

$$E_a = U + I_a r_a + 2\Delta U = 230 + 40.5 * 0.516 + 2 = 252.9(V)$$

- 查磁化曲线得

$$\begin{aligned} I_{f0} &= 1.73 + (2.07 - 1.73) * (252.9 - 249) / (264 - 249) \\ &= 1.73 + 0.34 * 3.9 / 15 = 1.815(A) \end{aligned}$$

- 考虑电枢反应的去磁作用

$$I_f = I_{f0} + 0.05 = 1.815 + 0.05 = 1.865(A)$$

直流发电机的运行特性

- 并励回路电阻

$$\sum r_f = R_f + r_f = U / I_f = 230 / 1.865 = 123.3(\Omega)$$

- 估计空载电势在264V~284V, U_0 与 I_f 满足

$$\begin{cases} U_0 = \sum r_f I_f = 123.3 I_f \\ \frac{U_0 - 264}{284 - 263} = \frac{I_f - 2.07}{2.75 - 2.07} \end{cases}$$

- 求解得

$$I_f = 2.163(A), \quad U_0 = 266.75(V)$$

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} = \frac{266.75 - 230}{230} * 100\% = 15.98\%$$



東南

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

直流发电机的运行特性

- (2)

- 当满载端电压为240V时

$$E_a = U + I_a n r_a + 2\Delta U = 240 + 40.5 * 0.516 + 2 = 262.9(V)$$

- 查磁化曲线得, 当不考虑电枢反应及串联磁势的磁化作用时励磁电流为

$$\begin{aligned} I_{f0} &= 1.73 + (2.07 - 1.73) * (262.9 - 249) / (264 - 249) \\ &= 1.73 + 0.34 * 13.9 / 15 = 2.045(A) \end{aligned}$$



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流发电机的运行特性

- 保持场阻不变，并励绕组的实有励磁电流为

$$I_{f0} = U / \sum r_f = 240 / 123.3 = 1.946(A)$$

- 实际运行时，总的励磁安匝数为并励安匝、串励安匝、电枢反应去磁安匝之和，故

$$N_f I_{f0} = N_f I_f + N_s I_a - F_{aqd}$$

$$N_f * 2.045 = N_f * 1.946 + 5 * 40.5 - N_f * 0.05$$

$$\text{即 } N_f = 40.5 * 5 / (2.045 - 1.946 + 0.05)$$

$$= 202.5 / 0.150 = 1350(\text{匝})$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流发电机的运行特性

- (3)
 - 用试探法，设令满载电压 $U=246V$ ，则感应电势

$$E_a = 246 + 40.5 * 0.516 + 2 = 268.9(V)$$

- 查磁化曲线得到不考虑电枢反应及串联磁势的磁化作用时所需励磁电流为

$$I_{f0} = 2.07 + (2.75 - 2.07) * (268.9 - 264)$$

$$/ (284 - 264) = 2.07 + 0.68 * 4.9 / 20 = 2.24(A)$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流发电机的运行特性

- 实际运行时的磁势平衡为

$$I_f = I_{f0} + F_{agd} / N_f - N_s * I_a / N_f$$

$$= 2.24 + 0.05 - 10 * 40.5 / 1350 = 1.99(A)$$

- 应用欧姆定律于并励绕组，可得

$$I_f = U / (R_f + r_f) = 246 / 123.3 = 1.995(A)$$

- 所得结果已足够准确，故得满载电压为246V



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 直流电动机的机械特性和工作特性

- 并励电动机的特性
 - 转矩特性
 - 转速特性
- 串励电动机的特性
 - 转矩特性
 - 转速特性
 - 机械特性
- 复励电动机的特性
- 永磁直流电动机
- 直流电动机稳定运行条件



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 直流电动机的机械特性和工作特性

直流电动机的作用原理

- 电枢绕组和励磁绕组分别施加直流电源。气隙中主磁通与电枢电流相互作用产生电磁转矩，

$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

- 电磁力矩为原动力矩，在电磁力矩的作用下，驱动轴上的机械负载旋转
- 电枢绕组感应电势为

$$E_a = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = C_e \Phi n$$



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 直流电动机的机械特性和工作特性

- 转矩特性

$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a \quad \text{当 } U = U_N; I_f = I_{fN}$$

- 转速特性

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi} \quad \left. \begin{array}{l} \text{转矩特性} \\ \text{转速特性} \end{array} \right\} \text{消去 } I_a$$

- 转速与转矩特性（机械特性， $T-n$ 曲线）

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

在不同的励磁方式下，主磁通随负载电流的变化不同，导致电机特性的差异。



东南大学电气工程学院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

！ 并励电动机的特性

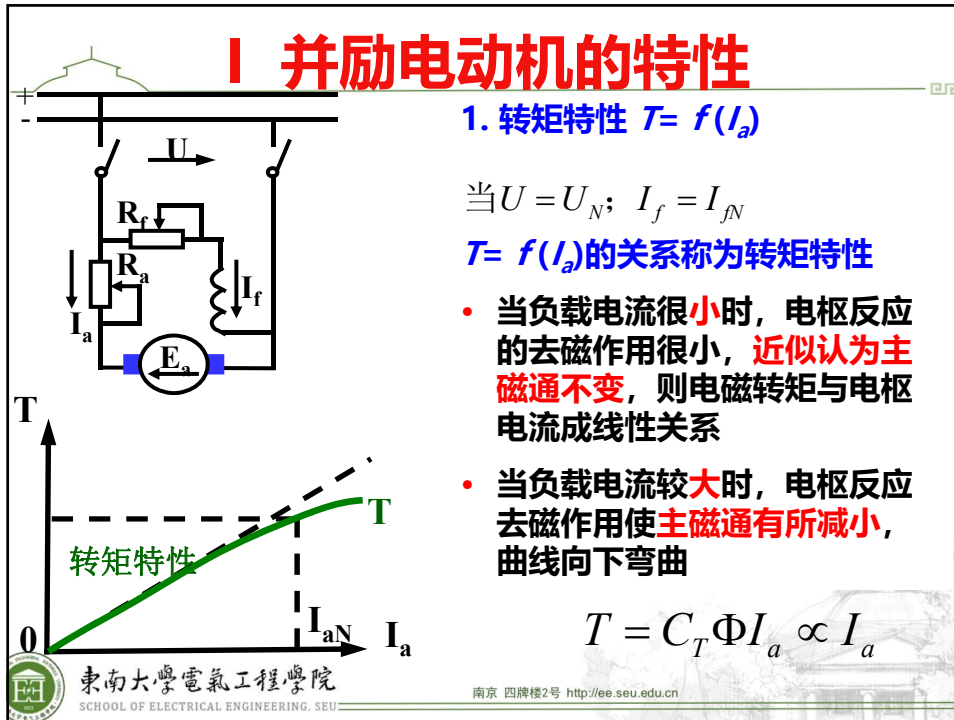
1. 转矩特性 $T = f(I_a)$

当 $U = U_N$; $I_f = I_{fN}$

$T = f(I_a)$ 的关系称为转矩特性

- 当负载电流很小时，电枢反应的去磁作用很小，近似认为主磁通不变，则电磁转矩与电枢电流成线性关系
- 当负载电流较大时，电枢反应去磁作用使主磁通有所减小，曲线向下弯曲

$$T = C_T \Phi I_a \propto I_a$$



！ 并励电动机的特性

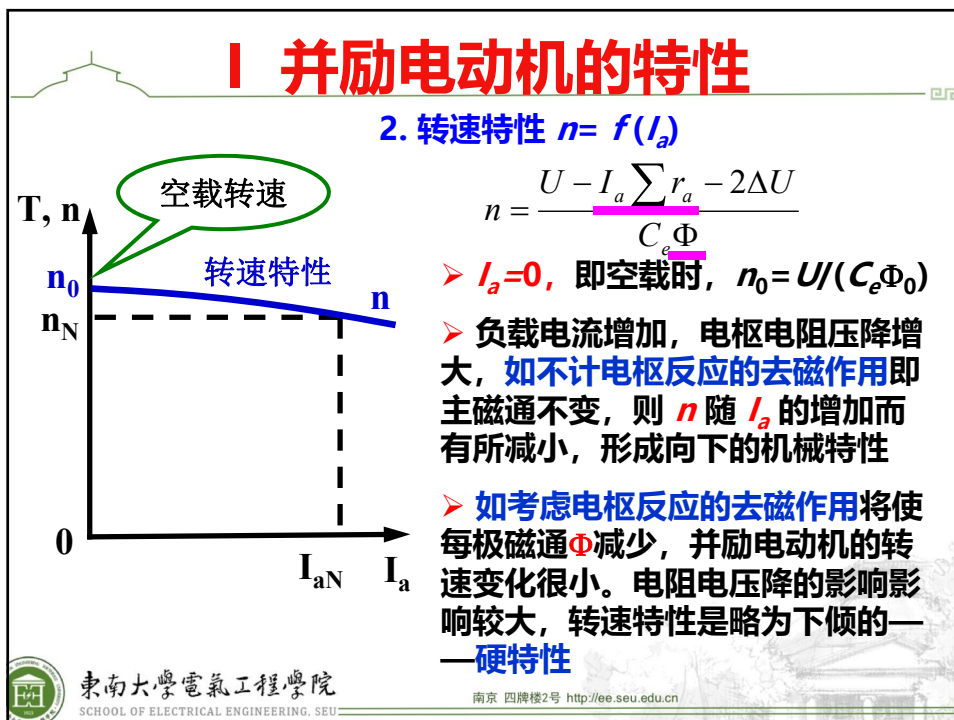
2. 转速特性 $n = f(I_a)$

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

➤ $I_a = 0$ ，即空载时， $n_0 = U / (C_e \Phi_0)$

➤ 负载电流增加，电枢电阻压降增大，如不计电枢反应的去磁作用即主磁通不变，则 n 随 I_a 的增加而有所减小，形成向下的机械特性

➤ 如考虑电枢反应的去磁作用将使每极磁通 Φ 减少，并励电动机的转速变化很小。电阻电压降的影响较大，转速特性是略为下倾的——硬特性



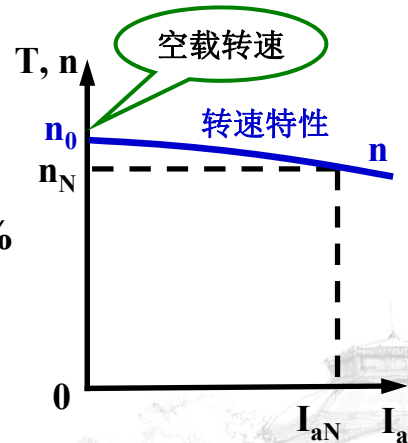
！ 并励电动机的特性

— 转速变化率

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} * 100\%$$

• 硬特性

$$\Delta n = 3\% \sim 8\%$$



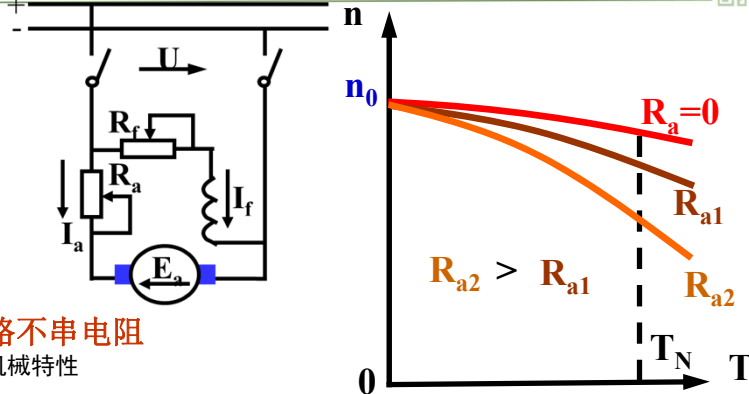
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

！ 并励电动机的特性

3. 机械特性

$$n = f(T)$$



- 电枢回路不串电阻
 - 自然机械特性

- 电枢回路串电阻
 - 电阻越大，转速越低

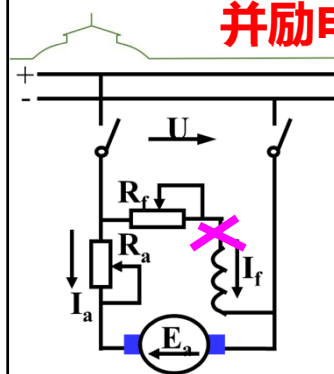
$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

并励电动机励磁失磁的分析



$$E_a = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = C_e \Phi n$$

$$T = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

$$E_a = U - I_a \sum r_a - 2\Delta U$$

➤ 当励磁回路断路时，气隙中的磁通将骤然降至微小的剩磁，电枢回路中的感应电势也将随着减小；

➤ 由于惯性，电机速度不能突变，电枢电流将急剧增加，使电动机严重过载；

电磁转矩的变化：

(1) 若负载为重载，电磁转矩克服不了负载转矩，电机可能停转（类似于堵转），此时电流很大。

(2) 若负载为轻载，电机转速迅速上升，造成“飞车”。

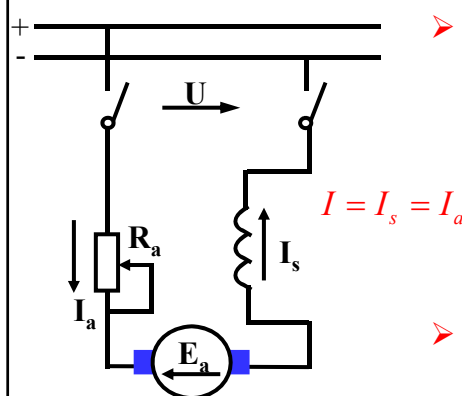


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 串励电动机的特性

1. 转矩特性 $T = f(I_a)$



➤ 当负载电流（即励磁电流）很小时，铁心处于不饱和状态，主磁通随励磁成正比增加，即

$$\Phi = K I_a$$

$$T = C_T \Phi I_a = C_T K I_a^2 = \frac{C_T}{K} \Phi^2$$

➤ 当负载电流较大时，铁心饱和，主磁通随励磁变化较小（近似不变）

$$T = C_T \Phi I_a \propto I_a$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

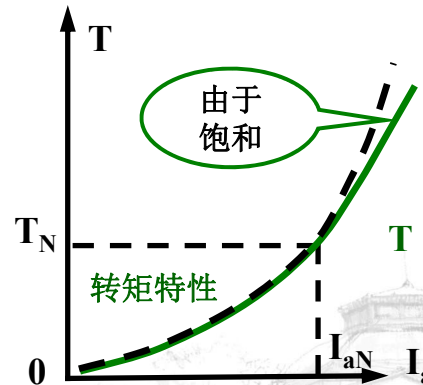
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 串励电动机的特性

— 转矩特性

- 励磁电流等于电枢电流，故每极磁通近似与电枢电流成正比，转矩特性为2次曲线

$$T = C_T \Phi I_a = C_T K I_a^2$$

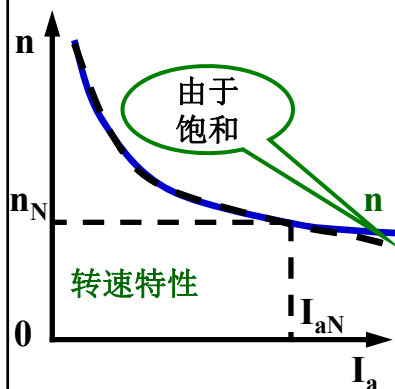


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 串励电动机的特性

2. 转速特性 $n = f(I_a)$



- 当负载电流很小时，铁心处于不饱和状态，主磁通随励磁成正比增加，即 $\Phi = K I_a$

$$n = \frac{U - I_a \sum r_a - 2\Delta U}{C_e \Phi} = \frac{U - 2\Delta U}{C_e K I_a} - \frac{\sum r_a}{C_e K}$$

- 当负载电流较大时，铁心饱和，主磁通随励磁变化较小，随电流增加转速略有下降



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流电动机的特性

节测试题		
序号	内容	答案
1	试题 一台直流电动机，机械特性较硬，所指的含意是（ ）。	
	选项 A 随着负载转矩的增大，转速下降得较快 B 随着负载转矩的增大，转速上升得较快 C 随着负载转矩的增大，转速下降得较慢 D 随着负载转矩的增大，转速上升得较慢	
2	试题 并励直流电动机在运行时励磁绕组断开了，如果负载很大，电机将（ ）。	
	选项 A 飞车 B 停转 C 可能飞车，也可能停转 D 转速降低，但不会停转	
3	试题 一台串励直流电动机，当电源反接时，其中电枢电流的方向（ ），转速方向（ ）。	
	选项 A 反向，反向 B 不变，不变 C 反向，不变 D 不变，反向	

答案：C，B，C

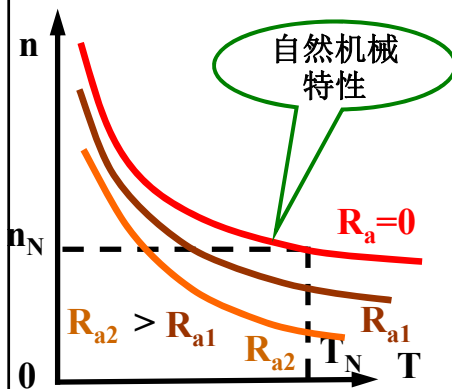


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 串励电动机的特性

3. 机械特性 $n = f(T)$



$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

$$T = C_T \Phi I_a = C_T K I_a^2 = \frac{C_T}{K} \Phi^2$$

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \sqrt{\frac{K}{C_T} T}} - \frac{\sum r_a}{C_e K} = \frac{U - 2\Delta U}{a \sqrt{T}} - b$$

在工作范围内，转速随负载电流急剧变化——软特性。

不能在极轻负载下运行

$$\text{转速变化率} = \frac{n_{\left(\frac{1}{4}\right)} - n_N}{n_N} \times 100\%$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

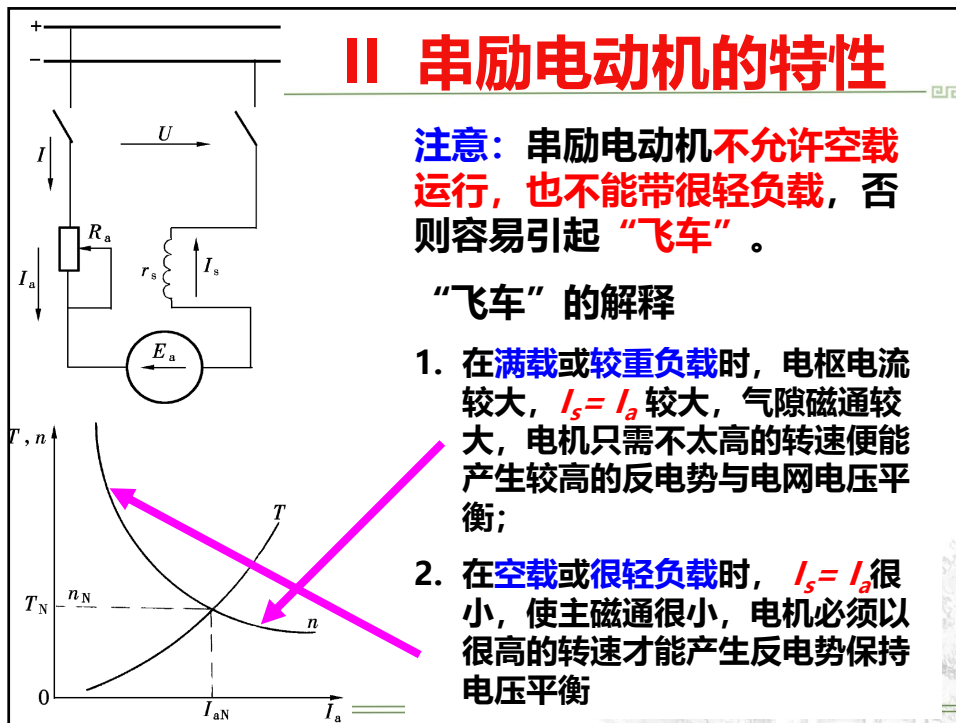
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 串励电动机的特性

注意：串励电动机**不允许空载运行，也不能带很轻负载**，否则容易引起“飞车”。

“飞车”的解释

1. 在**满载或较重负载**时，电枢电流较大， $I_s = I_a$ 较大，气隙磁通较大，电机只需不太高的转速便能产生较高的反电势与电网电压平衡；
2. 在**空载或很轻负载**时， $I_s = I_a$ 很小，使主磁通很小，电机必须以很高的转速才能产生反电势保持电压平衡



III 复励电动机的特性

• 复励电动机的特性

— 一般为积复励

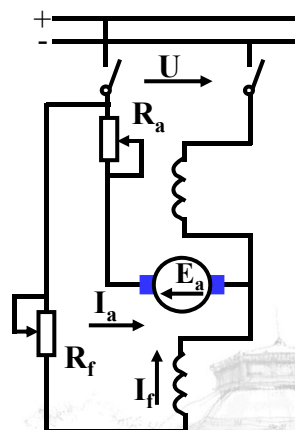
• 串励和并励的作用相加

— 特性介于并励和串励之间

• 特性偏向取决于并励和串励的比例

• 串励可以补偿电枢反应去磁

• 复励可以空载和轻载工作



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III 复励电动机的特性

以并励为主的积复励：

当负载转矩突然增加时，电枢电流增大（电枢反应去磁作用增强），串励磁势增加，使主磁通增大。

- 使电磁转矩很快的增大以克服突然增大的负载转矩；
- 使反电势很快的增大以减小电枢电流的冲击值。
- 当电枢反应去磁作用很强时，仍能使电机有下降的机械特性，保持其稳定运行。

适当地选择并励磁势和串励磁势的相对强弱，可使复励电动机具有负载所需要的特性。



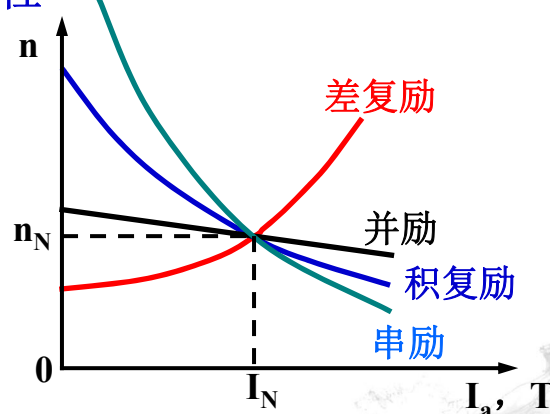
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III 复励电动机的特性

• 各种电动机特性比较

— 转速特性

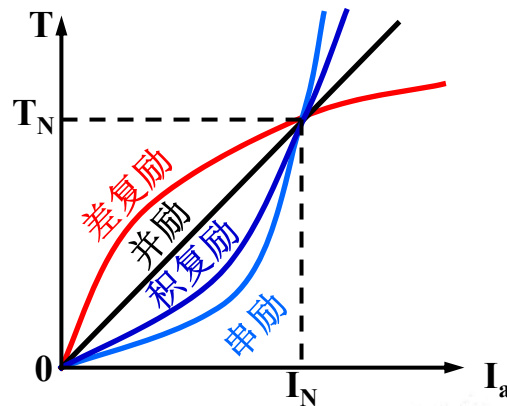


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III 复励电动机的特性

— 转矩特性



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV 直流电动机稳定运行条件

- 直流电动机的稳定条件
 - 当负载波动，转速变化，恢复到原来的工作状态的能力
 - 稳定运行：要求机械特性与负载特性相匹配
 - 稳定条件
 - 设机械特性为： $T = f(n)$
 - 设负载特性为： $T_{\Sigma} = f(n)$
 - 稳定条件为：

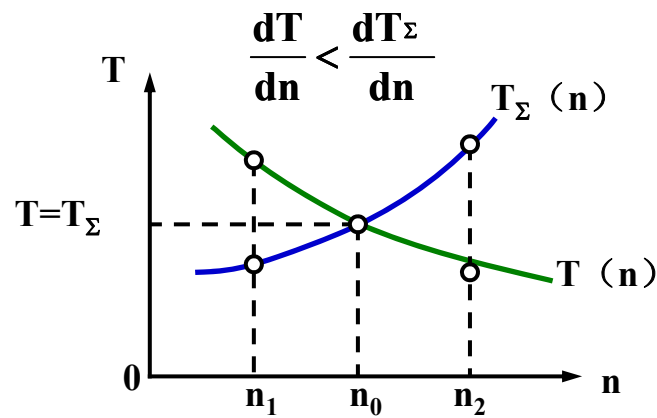
$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_{\Sigma}}{dn} \Rightarrow \begin{cases} T_{\Sigma} = \text{const} \\ \frac{dT}{dn} < 0 \end{cases}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV 直流电动机稳定运行条件



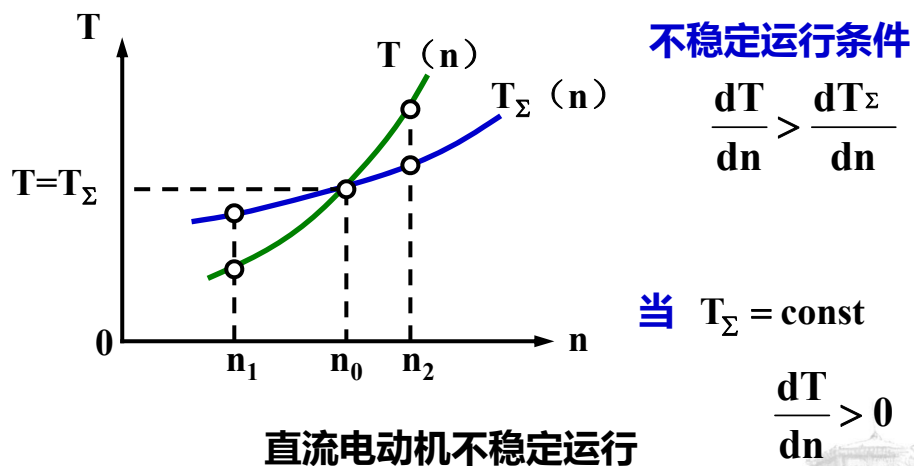
直流电动机稳定运行条件



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV 直流电动机稳定运行条件



在恒负载转矩条件下，下降的机械特性电动机能稳定运行，上升的机械特性电动机不能稳定运行。



4. 直流电动机的 起动、调速和制动

- 直流电动机的起动
 - 直接起动
 - 电枢回路中串变阻器
 - 降压起动
- 直流电动机的调速（重点掌握）
 - 调节励磁电流
 - 调节外施电源电压
 - 电枢回路中引入可调电阻
- 直流电动机的制动
 - 能耗制动
 - 回馈制动
 - 反接制动



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I 直流电动机的起动

一、直流电动机的起动

• 对起动性能的要求:

- T_{st} 足够大
- I_{st} 尽量小

• $n=0$ 到 $n=n_N$ 的过程

• 特点:

起动瞬间: $n=0$, $E=0$,

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$$

• 起动的过程

- 施加电源
- 电枢由静止加速, 直至达到预定速度
- 电磁转矩与负载转矩达到平衡

• 对电网有冲击, 必须限流



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流电动机的起动

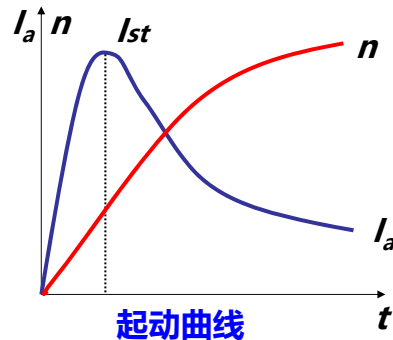
• 起动曲线

$$U = E_a + I_a R_a + L \frac{di_a}{dt}$$

$$E_a = C_e \Phi n = C_T \Phi \Omega$$

$$T_e = C_T \Phi I_a$$

$$T_e - (T_L + T_0) = J \frac{d\Omega}{dt}$$



• 注意:

- 有 L , 电流不能突变
- 有 J , 转速不能突变



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

直流电动机的起动

• 几种起动方法

• 直接起动

- 方法简单, 但起动电流很大
- 适合于小容量电机

• 电枢回路串电阻

- 可以限制起动电流, 但需要可变电阻箱
- 能耗较大, 不经济

• 降压起动

- 可以限制起动电流, 但需要降压设备



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I 直流电动机的起动

(1) 直接起动

- $t=0$ 时, $n=0$, $E_a=0$, $I_{st}=U/r_a$ 很大 ($10\sim 20I_N$)
- 缺点: 损坏电枢绕组、导致换向器环火
- 优点: T_{st} 大 (因为 I_{st} 产生的起动转矩)
- 特点: 随着速度增加, 反电势增加, 电枢电流反而下降。



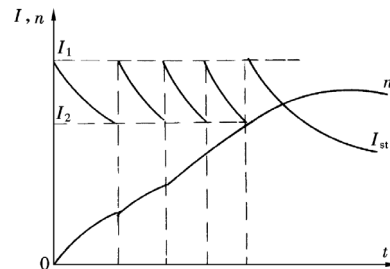
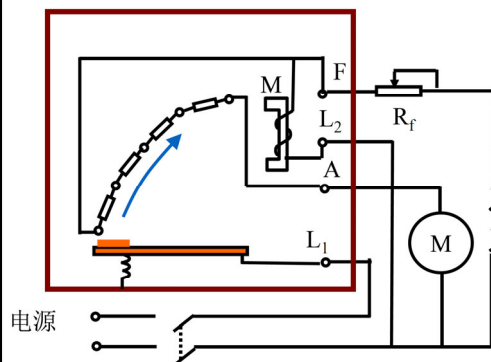
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

I 直流电动机的起动

(2) 电枢回路中串变阻器: 限制起动电流

- 变阻器起动: 起动时, 在电枢回路中串入变阻器, 当转速逐渐上升时, 可把起动电阻逐级切除。
- 起动过程中, 每切除一级起动电阻时, 起动电流将突然跃升, 通常把起动电流限制在两个极限值之间。



直流电动机起动时的
电流与转速

四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

I 直流电动机的起动

(3) 降压起动

- 一般只适用于大容量频繁起动的直流电动机，须用专门的调压电源。
- 优点：起动电流小，起动消耗能量少，升速比较平稳。
- 在起动过程中，可逐步提升电源电压，使按需要的加速度上升。在实用中，发电机-电动机组即采用降压起动法，其中，发电机及电动机均采用他励，以保证起动时有足够的励磁电流。“整流器-电动机”组也采用此方法。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I 直流电动机的起动

• 降压起动

- 用于大型直流电动机起动
- 可以有效降低起动电流
- 起动时改接成他励
 - 励磁不受影响
 - 要保证有足够的起动转矩
- 逐步升高电压，保证起动平稳



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

调速：根据负载(负载转矩)改变转速

$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

电枢回路中的串联电阻



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

基本要求：调速范围广、调速连续平滑、损耗小、经济指标高等。

$$n = \frac{U - I_a(r_a + R_a) - 2\Delta U}{C_e \Phi}$$

电枢回路中的串联电阻

1. 调节励磁电流以改变每极磁通 Φ ;
2. 调节外施电源电压 U ;
3. 电枢回路中引入可调电阻 R_a 。

调速性能：

速比：最高与最低速度之比；平滑性或跳级调速；**经济性：**损耗、效率，调速设备简单、可靠、操作方便等。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

1. 调节励磁电流以改变每极磁通 Φ

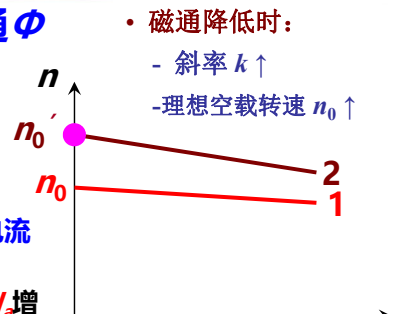
$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

调速方法:

- 增加励磁回路中串联电阻 $\sum r_f$, 则励磁电流减小, 每极磁通 Φ 减小;
- n 不能突变, $E_a = C_e \Phi n$ 减小, 电枢电流 I_a 增大, 导致 $T = C_T \Phi I_a$ 将增加, 使电机加速;

特点:

- E 变化不大; 几乎是恒效率
- 调速的范围小



$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

$$\frac{n_2}{n_1} \approx \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

2. 调节外施电源电压 U

励磁恒定时, 如他励

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad \rightarrow \quad n = n_0 - kT$$

变化趋势:

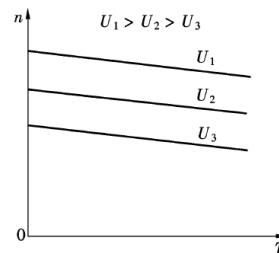
- 端电压 U 变化时:
 - 斜率 k 相同
 - 理想空载转速 n_0 不同
 - 一组平行线
- 升压升速!!!

• 结果:

- $U_1 > U_2 > U_3$ 时
- $n_1 > n_2 > n_3$

可以准确计算!!!

- 在很广的范围内平滑调速, 且电动机的机械特性硬度保持不变。



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

图 17-23 调节电源电压时机械特性

II 直流电动机的调速

2. 调节外施电源电压 U

负载转矩恒定时

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{\sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T \quad \rightarrow \quad \frac{n_1}{n_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

2. 调节外施电源电压 U

实现方法:

- 用调电压装置
(注意: 是调直流电压)
- 最早: 发电机-电动机组
- 实验室最常用的: 调交流, 整流后变直流
- 现在: 晶闸管可控整流
- 最好: 直流斩波器----脉宽调制PWM, 调占空比

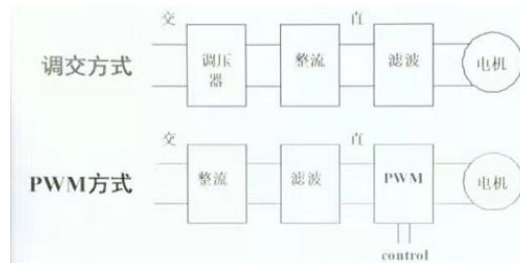


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

2. 调节外施电源电压 U



特点

- 平滑连续，性能最好
- 可以兼顾到起动
- 设备复杂，价格高



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

3. 电枢回路中串可变电阻 R_a

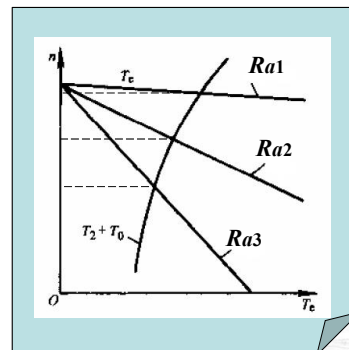
变化趋势

- 串电阻 R_a 时:
 - 斜率 k 变化
 - 理想空载转速 n_0 相同
 - 一组相交线

串阻降速!!!

- 结果:
 - $R_{a3} > R_{a2} > R_{a1}$ 时
 - $n_3 < n_2 < n_1$

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + \sum r_a}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - kT$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

76

II 直流电动机的调速

3. 电枢回路中串可变电阻 R_a

➤ 实现方法

- 串一组电阻

改变电阻 R_a ，即相当于改变了电动机的电枢绕组两端电压。

➤ 特点

- 转速只能调慢，不能调快
- 调速的平滑性差，分段调节
- 效率低，电阻耗能



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

直流电机调速过程（计算题的思路）

1) 根据最后负载转矩，稳态电流

---如果负载转矩不变，则电枢电流不变

$$T = C_T \Phi I_a$$

2) 根据电压方程，看稳态电势

---如果电压升高，则电势也升高

---如果电阻增加，则电势降低

$$E = U - I_a (r_a + R_a) - 2\Delta U$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

直流电机调速过程（计算题的思路）

3) 根据电势大小，求稳态转速

---如果电势升高，则转速也升高

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi}$$

4) 如果是调磁调速，注意：

---稳态电枢电流与磁通有关 $\rightarrow T = C_T \Phi I_a$

---最后电势和磁通都有变化

$$E_a = U - I_a (r_a + R_a) - 2\Delta U \quad \rightarrow \quad n = \frac{E_a}{C_e \Phi}$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 直流电动机的调速

直流电机调速过程（计算题的思路）

5) 一般利用电势和转矩系数互换

$$C_T \Phi = \frac{E_a}{\Omega} = \frac{T}{I_a}$$

6) 如果有动态计算的问题，注意：

---调速瞬间转速不能突变，据此求解 E_a

例题17-3参考以上思路分析



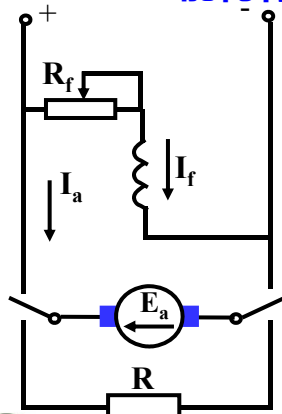
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III 直流电动机的制动

什么是制动：是指产生与转速方向相反的电磁转矩，目的是使电机尽快停转或由高速进入低速运行。

1. 能耗制动：动能制动



➤ 将电动机的电枢回路从电源断开后，立即接到一个制动电阻 R 上，电机的励磁电流保持不变；

➤ 电机依据转子动能继续旋转，电机变成他励发电机运行，将贮藏在转动部分的动能变为电能，在电阻负载中消耗掉；

➤ 电枢电流所产生的电磁转矩方向与转子旋转方向相反，产生制动作用，使转速迅速下降，直至停转。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

III 直流电动机的制动

2. 回馈制动

➤ 当电动机的转速高于某一数值时，电动机的反电势 E 大于电机电源电压 U ，即 $E > U$ ，电枢电流将反向，电机进入发电机的运行状态而起制动作用，可限制转速的持续上升。适用于由串励电动机驱动的升速场合，如电车下坡。

➤ 为保证励磁，需将串励绕组改为他励，且施加一定的励磁电压。

➤ 电功率回馈至电网，其来源于电天下坡时所释放的位能。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

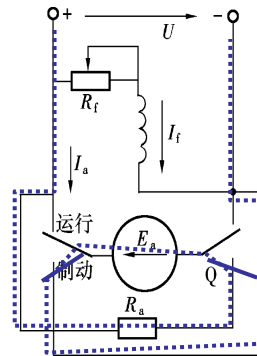
III 直流电动机的制动

3. 反接制动

励磁回路不变，电枢回路反接

$$n = \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{-U - I_a(r_a + R_a)}{C_e \Phi}$$

$$= \frac{-U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + r_a}{C_e C_T \Phi^2} T'_M$$



当转速为零时，制动转矩不为零，应及时将电源切除，否则将反转。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

III 直流电动机的制动

小结:

• 能耗制动

- 切断电源
- 然后电枢回路串电阻
 - 将动能变为电能消耗在电阻上
- 应用范围和效果
 - 他励、并励和复励
 - 简单
 - 但低速性能不好，需要和机械制动配合



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

III 直流电动机的制动

• 回馈制动

小结:

- 用于限制转速过高
 - 如电车下坡, 电机为发电状态
- 将串励改接成他励
- 能量回馈电网

• 反接制动

- 使电机迅速停转或反转
- 励磁不变
- 电枢回路反接到电源
 - 瞬间电流很大

$$I_a = \frac{-U - E}{r_a}$$

- 可串入电阻限流



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

本章重点

- 直流发电机电压建起的条件
- 直流发电机的运行特性
 - 外特性
- 直流电动机的运行特性
 - 机械特性
- 直流电动机的起动方法和调速
 - 优缺点



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

作业

➤ 习题: *p.* 365~367: 17-1, 17-2, 17-4,
17-5、17-10



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>